

Experimental Study of Steady-State Tube Expansion by using Conical Mandrel.

Dr. Tahseen Taha Othman

College of Engineering , University of Tikrit / Tikrit.

Email:Tahseenothonman@yahoo.com.

Dr. Hazim Khalil Khalaf

College of Engineering , University of Tikrit / Tikrit.

Jalal Khorshed Alyan

College of Engineering , University of Tikrit / Tikrit.

Abstract

An Experimental study Conducted for the continuous expansion process of the brass (70/30) tubes by pushing a conical rigid mandrel inside the tube mechanically.

This study included an empirical part throughout the test of (60) tube samples to give a different expanding ratios up to (40%) and almost at semi-cone angle of the mandrel ranging from small, medium and large angles (10° , 20° and 30°) in addition to that the samples with different relative thicknesses (0.05, 0.1, 0.15 and 0.2). The theoretical part ensures that for the predicted with relative forming stress that needed to complete the expansion process in addition to the changes in the stresses of the various exposed a wall of the sample tube ,The study included the influence of work hardening property which earns this study has a great importance in how to deal with this property. This study showed a good agreement between both theoretical and practical parts, especially in determining the relative forming stress necessary for the success of the operation that showed the relative forming stress increases as the expansion ratio and the semi-cone angle of the mandrel increases has ranged between (0.1-0.7) of the samples tested. Noting that the formation is influenced by the first was much larger than the second was. Whereas the relative forming stress decrease as the relative thickness increase for the same expansion ratio and the semi-cone angle of the mandrel formation.

Keywords: Plasticity, Thick wall theory, Work hardening

<https://doi.org/10.30684/etj.33.7A.19>

2412-0758/University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq

This is an open access article under the CC BY 4.0 license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

دراسة تجريبية لعملية التوسيع المستقر للأنابيب باستخدام قوالب مخروطية

الخلاصة

أجريت دراسة تجريبية لعملية توسيع الأنابيب المستقرة وذلك من خلال دفع قالب تشكيل فولاذي مخروطي الشكل بداخل أنابيب من البراص (70/30) ميكانيكيا. وتضمنت الدراسة جانباً عملياً من خلال اختبار (60) عينة أنبوبية لتعطي نسب توسيع مختلفة تصل إلى (40%) تقريباً، وبزاويا نصفية لقوالب التشكيل تراوحت ما بين زوايا صغيرة ومتوسطة وكبيرة وهي (10°, 20°, 30°) علاوة على كون العينات ذات أربعة اسماك نسبية مختلفة هي (0.05 , 0.1 , 0.15 , 0.2) كما وتضمن الدراسة جانباً نظرياً استند على كون الأنابيب ذات جدران سميكة للتنبؤ بعلاقة الإجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع، وتضمنت الدراسة تأثير خاصية الأصلاذ الانفعالي الأمر الذي يكسب هذه الدراسة أهمية في كيفية التعامل مع هذه الخاصية. أثبتت الدراسة توافقاً جيداً بين الجانبين النظري والعملي وخصوصاً في تحديد إجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع، وبينت الدراسة أن إجهاد التشكيل النسبي يزداد كلما زادت نسبة التوسيع والزاوية النصفية لقوالب التشكيل وقد تراوح بين (0.1-0.7) للعينات ألمختبره علماً إن تأثيره بنسبة التوسيع كان أكبر بكثير من تأثيره بالزاوية النصفية بينما قل إجهاد التشكيل كلما زاد السمك النسبي لنفس نسبة التوسيع والزاوية النصفية لقلب التشكيل.

كلمات مرشدة: لدونه، نظرية الجدران السميكة، تصليد انفعالي
قائمة الرموز والمصطلحات

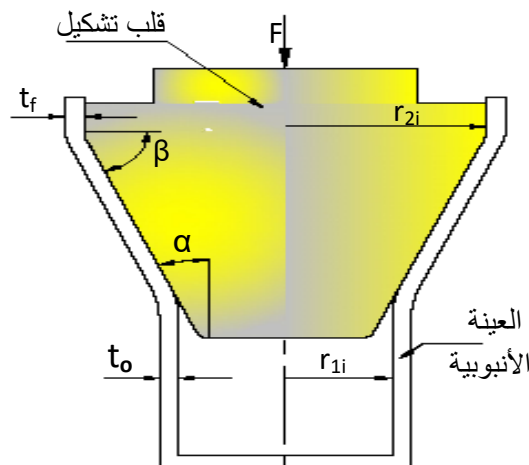
ER	نسبة التوسيع Expansion Ratio	S	الإزاحة المحورية لقلب التشكيل Mandrel Penetration (mm)
α <th>الزاوية النصفية لقلب التشكيل (درجة)</th> <td>F</td> <th>الحمل المسلط Load (KN)</th>	الزاوية النصفية لقلب التشكيل (درجة)	F	الحمل المسلط Load (KN)
m <th>معامل تصحيح correction factor</th> <td>σ</td> <th>الإجهاد الحقيقي True Stress (MPa)</th>	معامل تصحيح correction factor	σ	الإجهاد الحقيقي True Stress (MPa)
μ <th>معامل الاحتكاك Coefficient of Friction</th> <td>σ_z</td> <th>إجهاد التشكيل (الإجهاد المحوري) Forming Stress (MPa)</th>	معامل الاحتكاك Coefficient of Friction	σ_z	إجهاد التشكيل (الإجهاد المحوري) Forming Stress (MPa)
K	معامل التقسية الانفعالية Work-Hardening (MPa)	σ_r	الإجهاد الشعاعي Radial Stress (MPa)
r <th>نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي اللحظي (mm)</th> <td>σ_θ</td> <th>الإجهاد المحيطي Hoop Stress (MPa)</th>	نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي اللحظي (mm)	σ_θ	الإجهاد المحيطي Hoop Stress (MPa)
r_{1i} <th>نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي قبل التوسيع (mm)</th> <td>y_0</td> <th>إجهاد الخضوع الأحادي yield Stress (MPa)</th>	نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي قبل التوسيع (mm)	y_0	إجهاد الخضوع الأحادي yield Stress (MPa)
r_{1o} <th>نصف قطر العينة الأنبوبية الخارجي قبل التوسيع (mm)</th> <td>\bar{y}</td> <th>متوسط إجهاد الانسياب Mean flow Stress (MPa)</th>	نصف قطر العينة الأنبوبية الخارجي قبل التوسيع (mm)	\bar{y}	متوسط إجهاد الانسياب Mean flow Stress (MPa)
r_{2i} <th>نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي بعد التوسيع (mm)</th> <td>y_r</td> <th>إجهاد التشكيل النسبي Forming Stress Relative</th>	نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي بعد التوسيع (mm)	y_r	إجهاد التشكيل النسبي Forming Stress Relative
ϵ <th>الانفعال الحقيقي True Strain</th> <td>r_m</td> <th>متوسط نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي قبل التوسيع (mm)</th>	الانفعال الحقيقي True Strain	r_m	متوسط نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي قبل التوسيع (mm)
ϵ_θ <th>الانفعال المحيطي Hoop Strain</th> <td>t_0</td> <th>السمك الابتدائي للعينة الأنبوبية (mm)</th>	الانفعال المحيطي Hoop Strain	t_0	السمك الابتدائي للعينة الأنبوبية (mm)
ϵ_r <th>الانفعال السمكي Radial Strain</th> <td>t_f</td> <th>السمك النهائي للعينة الأنبوبية بعد التوسيع (mm)</th>	الانفعال السمكي Radial Strain	t_f	السمك النهائي للعينة الأنبوبية بعد التوسيع (mm)
ϵ_z <th>الانفعال الطولي longitudinal Strain</th> <td>t_r</td> <th>السمك النسبي للعينة الأنبوبية Relative tube thickness</th>	الانفعال الطولي longitudinal Strain	t_r	السمك النسبي للعينة الأنبوبية Relative tube thickness
		β	الزاوية المحصورة بين الضلع الجانب لقلب

المقدمة

إن عملية التوسيع الأنبوبي باستخدام قلب تشكيل مخروطي الشكل هي عملية تشكيل لدن للمادة تتم بتسليط قوة مقدارها (F) على قلب التشكيل الموضحة بالشكل (1) ليحدث تغييراً في نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي من نصف قطر أنبوب داخلي ابتدئي (r_{1i}) إلى نصف قطر نهائي للعينة الأنبوبية (r_{2i}) بعد عملية التوسيع النهائية والذي أفترض أن يكون مساوياً لنصف قطر الجزء الأسطواني من قوالب التشكيل. وقد أنجزت العديد من الدراسات والبحوث في هذا المجال ففي الحقبة الزمنية ما بين (1946-1980) طور كل من [3,2,1] حلول تحليلية أو شبه التحليلية وفي العام (1992) طور [4] نموذج في عملية توسيع الأنابيب بطريقة سحب قلب تشكيل من خلال عينات أسطوانية وذلك بفرض بقاء السمك ثابت وإهمال الانفعال المحوري في منطقة التشكيل وهناك من وضع حلول نظرية لعملية التوسيع للأنابيب ذات الجدران الرقيقة [7,6,5] الموضوعات تحت تأثير أنواع مختلفة من التحميل كما وطور (Karrech) [8] نموذجاً للتنبؤ لمجال الإجهادات في منطقة التوسيع والطاقة المبددة الناجمة عن العملية في حين تناولت [11,10,9] السلوك المرن - اللدن في الأسطوانات ذات الجدران السميكة. وافترض Seibi (2005) وآخرون [12] أن هنالك ضغط تماس بين قلب التشكيل والأنبوب يكون منتظماً لقيادة عملية التوسيع. أما [14,13] فقد طوروا حلولاً نظرية وتجريبية للفترة ما بين 2013-2011) للتنبؤ بالتغيرات التي تطرأ على كل من طول الأنبوب وسمك جداره.

إن تطبيقات البحث واسعة فهي ذات استخدامات واسعة في المنازل والمنشآت العامة والمركبات والفضاء والمجال العسكري والبحري والجوي وأبار النفط والغاز والمبادلات الحرارية وفي تطبيقات أخرى [17,16,15]. لما كانت الدراسات السابقة المنجزة في هذا المجال قد تناولت عملية التوسيع بجوانب محدودة خصوصاً في الأنابيب ذات الجدران السميكة لذا كان الهدف من هذا البحث هو إعداد دراسة شاملة لكافة متغيرات عملية التوسيع من خلال القيام بدراسة تجريبية واسعة النطاق وأجراء التحليلات النظرية للعملية ذاتها وخصوصاً في المجالات الآتية:

- 1- استخدام مادة أولية للعينة الأنبوبية بحيث تمتاز بخاصية إصلاح انفعالي عالي.
- 2- تحديد إجهاد التشكيل النسبي اللازم لإتمام عملية التوسيع باستخدام قوالب تشكيل ذات زوايا نصفية مختلفة وبنسب توسيع مختلفة وباستخدام عينات أنبوبية ذات أسماك نسبية مختلفة.
- 3- جمع أكبر قدر ممكن من المعلومات حول تأثير علاقة إجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع بمتغيرات عملية التوسيع.



شكل (1) يبين متغيرات عملية التوسيع عند الوصول إلى حالة الاستقرار.

النمذجة النظرية

Theoretical modeling

من المعلوم إن الأسطوانات عادة ما توصف بانها إما أن تكون مفتوحة النهاية لا وجود فيها للمركبة المحورية لإجهاد الجدار أو أسطوانات ذات نهايات مغلقة والتي فيها يجب تحديد المركبة المحورية لإجهاد الجدار للحصول على حالة الاتزان. ففي هذه الدراسة المرتبطة بإنجاز توسيع قطري للأنبوب باستخدام قلب تشكيل مخروطي ممتد داخل الأنبوب بتسليط قوة معينة ولأجل وضع حلول مبسطة. فابتداءً تم أخذ الانفعال في مستوي عمودي على المحور الطولي ($\varepsilon_z = 0$) وهذا يعني إن العينة الأنبوبية مقيدة بين طرفين ثابتين (إهمال التغير في الطول) [14].

وذلك لتحديد الإجهادات القطرية والمحيطية ثم بعدها يتم أخذ الأسطوانة مغلقة النهاية للحصول على الإجهاد الطولي (المحوري) من حالة الاتزان ألسكوني وذلك باعتبار إن الإجهاد المحيطي والقطري في حالة الأسطوانات مغلقة النهاية هو نفسه في حالة الأسطوانات مفتوحة النهاية وهكذا فإن مبدأ الإجهادات في الأسطوانات سميكة الجدران ذات النهاية المغلقة إعتبرت أن الإجهادات القطرية والمحيطية استندت على شرط الإجهاد في مستوى عند الأسطوانة ذات النهاية المفتوحة بينما الإجهاد المحوري قد تم إيجاده من حالة السكون البسيطة لتوازن القوى في حالة الأسطوانة مغلقة النهاية وهذه بالطبع استندت على افتراض إن الإجهاد الطولي هو شكل لإجهاد الجدار الذي لا يحصل فيه تغير عبر سمك الأسطوانة [10].

ولأجل التوصل إلى المعادلات الحاكمة للعملية ولكون جدار العينة الأنبوبية سميكة فقد تم انتقاء شريحة حلقيه من المادة الداخلية لجدار العينة الأنبوبية في منطقة التوسيع وكما تبدو لنا في الشكل (2-a) وذلك لحساب الإجهادات الواقعة على الجزء الحلقي بنفس مبدأ Saint-Venants principle وهو إن الإجهادات والانفعالات في جسم عند النقاط التي تكون بعيدة بشكل كافي من النقاط التي يطبق عليها الحمل تعتمد فقط على محصلة الأحمال ألسكوني وليس على توزيع الأحمال [13] علماً إن هنالك العديد من طرق التحليل المستخدمة في البحوث , ومن خلال الشكل يتضح لنا إن الجزء الحلقي يتعرض إلى إجهاد شعاعي (σ_r) عمودي وإجهاد محيطي (σ_θ) ناجمان عن التوسيع الحاصل في الاتجاه المحيطي لجدار العينة جراء تغلغل قلب التشكيل في العينة الأنبوبية. ولا بد من الإشارة هنا إلى أن عملية التوسيع الجارية هي شبيهة بتلك التي تجري على الأسطوانات المغلقة النهاية التي فيها تحتسب الإجهادات باستخدام معادلة لامي Liame's equation ذات الاستخدام الواسع في القنوات المتعرضة إلى ضغط [18] ففي هذه الحالة تكون العينة الأنبوبية متعرضة إلى ثلاثة أنواع من الإجهادات بالاتجاهات الثلاثة الشعاعية (σ_r) والمحيطية (σ_θ) والمحورية (σ_z). ولأجل تسهيل عملية التحليل يتم أخذ الإجهادات في مستوى حيث تتشابه عملية التحليل بين الأسطوانات المغلقة مع تلك المفتوحة النهاية الواحدة أو النهائيين على افتراض كون الإجهادين المحيطي والشعاعي لا يختلفان في الحالتين [14]. أما الإجهاد المحوري فيتم احتسابه عند أخذ الأسطوانة مغلقة النهاية وبأخذ حالة الاتزان لقلب التشكيل والعينة الأنبوبية كنظام واحدة وهذا بالطبع أستند على افتراض إن الإجهاد المحوري هو شكل لإجهاد الجدار الرقيق الذي لا يكون فيه تغيير عبر سمك العينة الأنبوبية. فيعد إجراء العديد من التحليلات الرياضية العديدة في هذا المجال تم اعتماد متوسط الإجهاد المكافئ ليحل محل إجهاد الخضوع الذي يربط العلاقة بين الإجهادات في مستوى حسب معياري Tresca أو Von mises للخضوع [19] وقد استند التحليل النظري على الفرضيات التالية.

- 1- إن مادة العينة تمتاز بتشوه لدن وصلب Rigid plastic deformation.
- 2- اعتبار التشوه متجانساً [13].
- 3- أن الاحتكاك المتولد بين الأسطح المتلامسة لكل من قلب التشكيل والعينة الأنبوبية في منطقة التوسيع من نوع كولومب وان قوة الاحتكاك منتظمة على طول سطح التلامس.
- 4- الزاوية المحصورة بين الضلع الجانبي لقلب التشكيل والسطح الأفقي (β) لا تكون أكبر من (60°) كي يتم إهمال إجهاد القص المتولد [14].
- 5- إن سرعة تغلغل القلب في الأنبوب قليلة وثابتة لذلك يتم إهمال التأثيرات الناجمة عن الحركة الديناميكية.

6- الأنبوب يكون في حالة من الإجهاد في مستوى مع الإجهاد المحوري ($\sigma_z = 0$) لغرض الحصول على الإجهاد الشعاعي (σ_r) والإجهاد المماسي (σ_θ) ثم ان الإجهاد الطولي (σ_z) يتم الحصول عليه من حال السكون لقلب التشكيل والأنبوب باعتبارهم نظاما واحدا وذلك بافتراض كون الإجهاد المحيطي والشعاعي هما نفسيهما في حالة كون الأنبوب مغلق النهاية أم مفتوحة [10].

والشكل (2-b) يظهر الشكل التخطيطي للجزء الحلقي المتعرض إلى إجهاد بالاتجاه المحيطي (σ_θ) وإجهاد آخر بالاتجاه الشعاعي (σ_r) متغير من السطح الداخلي للجزء الحلقي إلى السطح الخارجي له، وهذا الجزء له نصف قطر داخلي (r) وسمكه (dr) وارتفاعه (dy) وكما هو مبين في الشكل. ولاحتساب الإجهادات الواقعة عليه لابد من حساب المساحة الساقطة الأمامية والخلفية للجزء الحلقي وهي شبيهة بمساحة سطح معيني وحسب الشكل (2-c) و (2-d) الذي يبينان المساحة المعينية الساقطة الداخلية والخارجية على التوالي ومن خلالهما فان:

$$\text{Inner trapezoidal area} = \frac{dy}{2} \sin(\beta) (2r \sin(\beta) + 2r \sin(\beta) + 2 \cos(\beta)) \quad \dots (1)$$

$$\text{Outer trap. area} = \frac{dy}{2} \sin(\beta) [2(r \sin(\beta)) + dr \sin(\beta) + 2(r \sin(\beta) + dr \sin(\beta) + \cos(\beta))] \quad \dots (2)$$

وعند اخذ موازنة القوى بالاتجاه الشعاعي نحصل على:

$$\sigma_r \left(\frac{dy}{2} (4r \sin^2(\beta) + 2 \sin(\beta) \cos(\beta) dy) \right) - 2 \sigma_\theta (dy dr) - (\sigma_r + d\sigma_r) \left(\frac{dy}{2} (2r \sin^2(\beta) + 2 \sin^2(\beta) dr + 2r \sin^2(\beta) + 2 \sin^2(\beta) dr + 2 \sin(\beta) \cos(\beta) dy) \right) = 0 \quad \dots (3)$$

وبعد إجراء التبسيط وحذف الحدود ذات الدرجة الثانية الصغيرة نحصل على:

$$\left(\frac{d\sigma_r}{dr} \right) r \sin^2(\beta) + \sigma_r \sin^2(\beta) - \sigma_\theta \quad \dots (4)$$

ولما كان الأنبوب يتعرض إلى تشوه لدن كبير فإن العلاقة التي تربط الإجهادات فيما بينها هي باستخدام معياري Von mises أو Tresca للخطوع. وكما تم التنويه مسبقا بأننا سنعتبر إن العينة الأنبوبية مفتوحة النهاية بأخذ الإجهاد المحوري ($\sigma_z = 0$)، وباعتبار الإجهادات في مستوي فان معيار Von mises للخضوع للإجهادات الأساسية عند إهمال الإجهاد القصي يكون بالصورة الآتية:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = m \bar{y} \quad \dots (5)$$

حيث إن (m) هو ثابت تصحيح تتراوح قيمته بين (1.1 - 1.15) [14]. وان (\bar{y}) هو متوسط الإجهاد المكافئ والذي يتم احتسابه حسب المعادلة الآتية [19]:

$$\bar{y} = \frac{1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma d\epsilon \quad \dots (6)$$

و تمثل كل من ϵ_1 و ϵ_2 حدود قيمة الانفعال اللدن الحقيقي بدايته ونهايته لكل عينة أنبوبية على التوالي و (σ) هي دالة للإجهاد الحقيقي بدلالة الانفعال الحقيقي مأخوذة من منحنى اختيار الشد للجزء اللدن منه.

وبالتعويض عن الإجهاد المحيطي من المعادلة (5) في معادلة رقم (4) وإجراء بعض الترتيبات نحصل على العلاقة التالية:

$$\frac{d\sigma_r}{(1 - \sin^2(\beta))\sigma_r + m\bar{y}} = \frac{dr}{r \sin^2(\beta)} \quad \dots (7)$$

وبإجراء التكامل لطرفي المعادلة باعتبار إن حدود التكامل هي عندما:

$$r = r_{1i} \text{ and } r = r_{2i} \Rightarrow \sigma_r(r) = -p \quad \dots (8)$$

$$r = r_{10} \quad \text{and} \quad r = r_{20} \Rightarrow \sigma_r(r) = 0 \quad \dots (9)$$

$$\int_{-p}^0 \frac{d\sigma_r}{(1 - \sin^2(\beta))\sigma_r + m\bar{y}} = \int_{r_{1i}}^{r_{10}} \frac{dr}{r \sin^2(\beta)}$$

$$\frac{1}{1 - \sin^2(\beta)} \ln(1 - \sin^2(\beta) + m\bar{y}) \Big|_{-p}^0 = \frac{1}{\sin^2(\beta)} \ln r \Big|_{r_{1i}}^{r_{10}}$$

بعد إجراء سلسلة من العمليات الرياضية نحصل على:

$$p = \frac{m\bar{y}}{\sin^2(\beta) - 1} \left(\left(\frac{r_{10}}{r_{1i}} \right)^{J_1} - 1 \right) \quad \dots (10)$$

$$J_1 = \frac{\sin^2(\beta) - 1}{\sin^2(\beta)} \quad \text{حيث إن:}$$

ومن خلال المعادلة رقم (10) يتبين لنا إن القوة العمودية المتولدة بين الأسطح المتلامسة تعتمد على الزاوية (β) وخواص المادة (\bar{y}) والشكل الهندسي للعينة الأنبوبية وقلب التشكيل، وبأخذ توازن القوى على قلب التشكيل الشكل (3) نحصل على:

$$F = \pi(r_{2i}^2 - r_{1i}^2) (1 + \mu \cot(\alpha)) P \quad \dots (11)$$

وبعد التعويض عن قيمة (P) من معادلة رقم (10) في معادلة رقم (11) نحصل على:

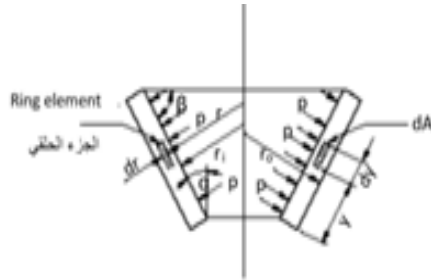
$$F = \pi(r_{2i}^2 - r_{1i}^2) (1 + \mu \cot(\alpha)) * \frac{m\bar{y}}{\sin^2(\beta) - 1} \left(\left(\frac{r_{10}}{r_{1i}} \right)^{J_1} - 1 \right) \quad \dots (12)$$

وحيث إن نسبة التوسيع (Expansion Ratio) ER (حاصل قسمة نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي بعد التوسيع (r_{2i}) على نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي قبل التوسيع (r_{1i})). والسك النسبي لجدار العينة الأنبوبية (Relative tube thickness (t_r)) حاصل قسمة السمك الابتدائي لجدار العينة (t_0) على متوسط نصف قطر العينة الابتدائي (r_m) فإن:

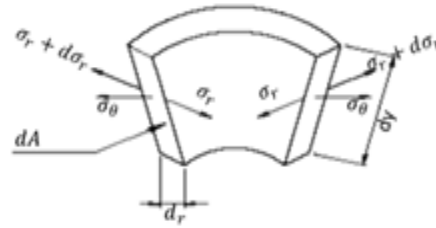
$$ER = \frac{r_{2i}}{r_{1i}} \quad \dots (13)$$

$$\frac{r_{10}}{r_{1i}} = \frac{2 + t_r}{2 - t_r} \quad \dots (14)$$

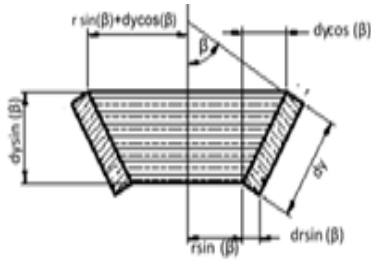
أما إجهاد التشكيل (الإجهاد المحوري (σ_z)) فيمكن إيجاده من حالة الاتزان لقلب التشكيل مع العينة الأنبوبية باعتبارهم نظاما واحدا بعد الوصول إلى حالة الثبات لنحصل على:



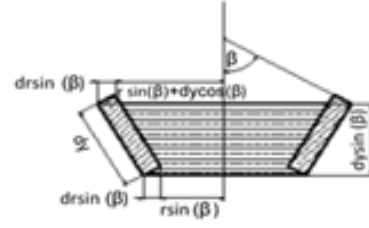
(b)



(a)



(c)

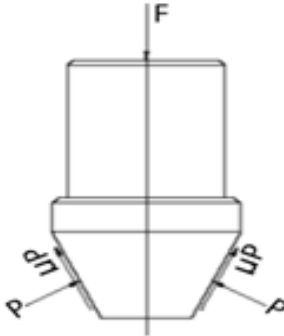


(d)

شكل رقم (2) يمثل (a) جزء من العينة الانبوبية اثناء التوسيع (b) الجزء الحلقي المقطع من العينة الانبوبية في مرحلة التوسيع (c) المساحة الساقطة للسطح الداخلي للجزء الحلقي (d) المساحة الساقطة للسطح الخارجي للجزء الحلقي

$$\sigma_z = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{\pi(r_{10}^2 - r_{1i}^2)} \quad \dots (15)$$

وبالنظر الى المعادلتين (12 and 15) نجد أن إجهاد التشكيل يعتمد على عدة عوامل منها: خصائص المادة متمثلة (\bar{y}) والشكل الهندسي للعينة الأنبوبية وقلب التشكيل وظروف الاحتكاك وتعويض المعادلات (12,13,14) في المعادلة (15) وقسمة الأخيرة على (\bar{y}) نحصل على:



شكل رقم (3) يمثل قالب التشكيل موضحة فيه القوى المؤثرة عليه

$$y_r = ((ER)^2 - 1)(1\mu \cot(\alpha)) * \frac{m}{\sin^2(\beta) - 1} * \left(\frac{\left(\frac{2+t_r}{2-t_r}\right)^{J_1} - 1}{\left(\frac{2+t_r}{2-t_r}\right)^2 - 1} \right) \dots (16)$$

حيث يمثل:

$y_r = \frac{\sigma_z}{\bar{y}}$ إجهاد التشكيل النسبي والمعادلة أعلاه هي العلاقة الرئيسية التي تربط كافة متغيرات عملية التوسيع بإجهاد التشكيل النسبي. ولحساب التغيرات التي تطرأ على الإجهاد الشعاعي عندما يكون جدار العينة الأنبوبية سميك تستخدم حدود التكامل التالية للمعادلة رقم (6) بدلا من الحدود السابقة وهي:

$$r = r_{1i} \Rightarrow \sigma_r(r) = \dots (17)$$

$$r = r \Rightarrow \sigma_r(r) = \sigma_r \dots (18)$$

وباستخدامها في معادلة رقم(6):

$$\int_{-P}^{\sigma_r} \frac{d\sigma_r}{(1 - \sin^2(\beta))\sigma_r + m\bar{y}} = \int_{r_{1i}}^r \frac{dr}{r \sin^2(\beta)} \dots (19)$$

وبعد إجراء التكامل والعديد من العمليات الرياضية يتم الحصول على العلاقة التي تحدد قيمة الإجهاد الشعاعي في أي موقع خلال سمك جدار العينة.

$$\sigma_r = \left(\frac{(\sin^2(\beta)-1)P + m\bar{y}}{1-\sin^2(\beta)} \left(\frac{r}{r_{1i}} \right)^{J_1} - \frac{m\bar{y}}{1-\sin^2(\beta)} \right) \dots (20)$$

وبالتعويض عن قيمة (P) من المعادلة رقم (10) نحصل على:

$$\sigma_r = \frac{m\bar{y}}{1-\sin^2(\beta)} \left(\left(\frac{r_{10}}{r_{1i}} \right)^{J_1} \left(\frac{r}{r_{1i}} \right)^{-J_1} - 1 \right) \dots (21)$$

وباستخدام معادلة رقم (5) ومعادلة رقم (21) نحصل على العلاقة التي يتم من خلالها حساب (σ_θ) او ما يسمى بالإجهاد المحيطي وهو كذلك سيكون دالة بدلالة نصف قطر:

$$\sigma_\theta = m\bar{y} \left(\frac{1}{1-\sin^2(\beta)} \left(\frac{r_{10}}{r_{1i}} \right)^{J_1} \left(\frac{r}{r_{1i}} \right)^{-J_1} + 1 \right) \dots (22)$$

حيث تمثل المعادلات (15، 21، 22) العلاقات الخاصة بحساب الإجهادات الرئيسية الخاصة بعملية التوسيع للأنبوبية.

الجانب العملي

تم في هذه الجانب إجراء العديد من التجارب الأولية لتحديد حدود قابلية التوسيع لمادة الأنبوب المقترحة، بعد ذلك تم إعداد التصاميم الخاصة بالعينات المختلفة وقلوب التشكيل، حيث صنعت (60) عينة أنبوبية وأجريت عليها عمليات التوسيع. كما تم إجراء تحليل كيميائي لمادة العينات وبين الجدول (2) العناصر الداخلة في تركيب مادة البراص (30-70) علماً إن المادة كانت عبارة عن قضيب ميثوق بقطر 50mm وبطول 2.5m للقضيب الواحد تم تصنيعها في شركة الشهيد العامة.

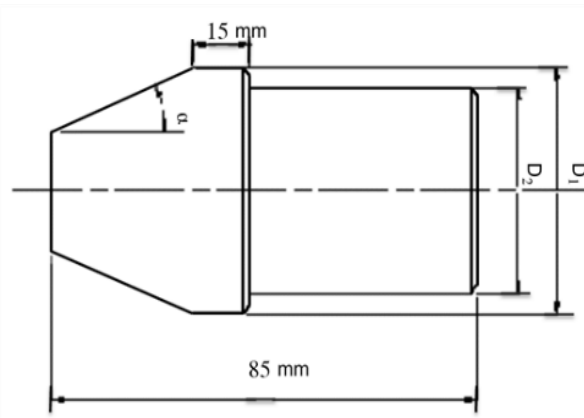
الجدول (2) يبين التركيب الكيميائي لمادة العينات الأنبوبية

element	Cu	Pb	Fe	Ni	Zn
Wt. %	69.71	0.05	0.04	0.033	Rem.

كما تم تصنيع (12) قالب تشكيل من مادة فولاذ متوسط الكربون (Ck 45) وأجريت لها المعاملات الحرارية اللازمة (52HRC) وهذه القوالب مختلفة من حيث الزوايا النصفية والأبعاد والشكل (4) يبين الأبعاد العامة لقوالب التشكيل والجدول رقم (3) يبين تلك الأبعاد الشكل رقم (5) يمثل صورة لقلوب التشكيل المختلفة المصنعة.

جدول (3) يبين أبعاد قوالب التشكيل المختلفة

Mandrel No.	α°	D ₁ mm	D ₂ mm
1-3	10, 20, 30	40	30
4-6	10, 20, 30	42	32
7-9	10, 20, 30	44	34
10-12	10, 20, 30	46	36



شكل (4) يمثل الأبعاد العامة لقالب التشكيل

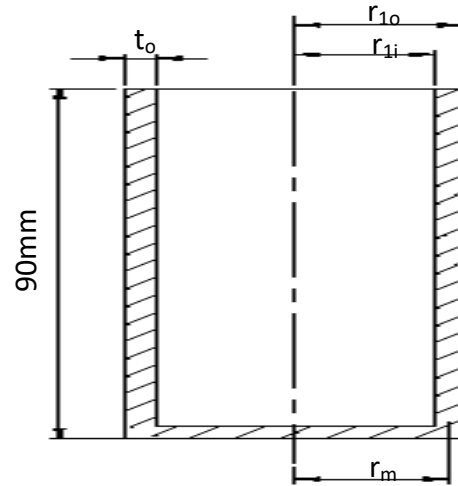
$\alpha = 10^\circ$



$\alpha = 20^\circ$



$\alpha = 30^\circ$



شكل (6) يبين الشكل الهندسي العام للعينات الأنبوبية المختلفة

أما الشكل (6) فيوضح الشكل الهندسي للعينات المستخدمة. وأنجزت جميع الاختبارات الأولية والنهائية بمختلف أنواعها على ماكينة اختبار جامعة Universal Testing Machine مبرمجة نوع (SHIMADZU 600kN)، وأنجزت الاختبارات بسرعة ثابتة لحركة المنضدة السفلى للماكينة بمقدار (10mm/min) وكانت الاختبارات وفق الترتيب الآتي:

Expansion Ratio Test

اختبار نسبة التوسيع

حيث تم إعداد (12) عينة أنبوبية لهذا الاختبار جميعها ذات نصف قطر ابتدائي داخلي (r_{i1}) يساوي (19) ملم وبطول (90) ملم وسمك نسبي ($t_r = t_o/r_m$) لجدار العينة بلغ (0.1)، حيث تم تنفيذ الاختبار بعد أن تم تزييت العينات وقوالب التشكيل بمزيت تم تحضيره بخلط زيت معدني مع مادة الكرافيت بنسب حجمية (2) كرافيت إلى (1) زيت معدني [5 and 20]، وقد تم استخدام هذا الخليط في جميع التجارب. نفذت عملية التوسيع على أربعة عينات باستخدام قوالب التشكيل ذات الزاوية النصفية (10°) وبنسبة التوسيع المختلفة التي تم تحديدها مسبقا وهي (, 1.1052 , 1.1579 and 1.21). تم إيقاف تغلغل قالب التشكيل بداخل العينة بعد وصول عملية التوسيع إلى حالة الاستقرار، وأخذت العلاقة بين الحمل المسلط والإزاحة المحورية من الجهاز مباشرة، كررت العملية أعلاه ولكن باستخدام قوالب التشكيل ذات الزاوية النصفية (20°) وبأربعة عينات جديدة، ثم كررت مرة ثالثة باستخدام قوالب التشكيل ذات الزاوية النصفية (30°)، وفي كل مرة يتم أخذ العلاقة بين الحمل المسلط على العينة الأنبوبية والإزاحة المحورية والشكل رقم (7) يبين صور العينات بعد التوسيع في هذا الاختبار.

$\alpha = 10^\circ$



$\alpha = 20^\circ$



$\alpha = 30^\circ$



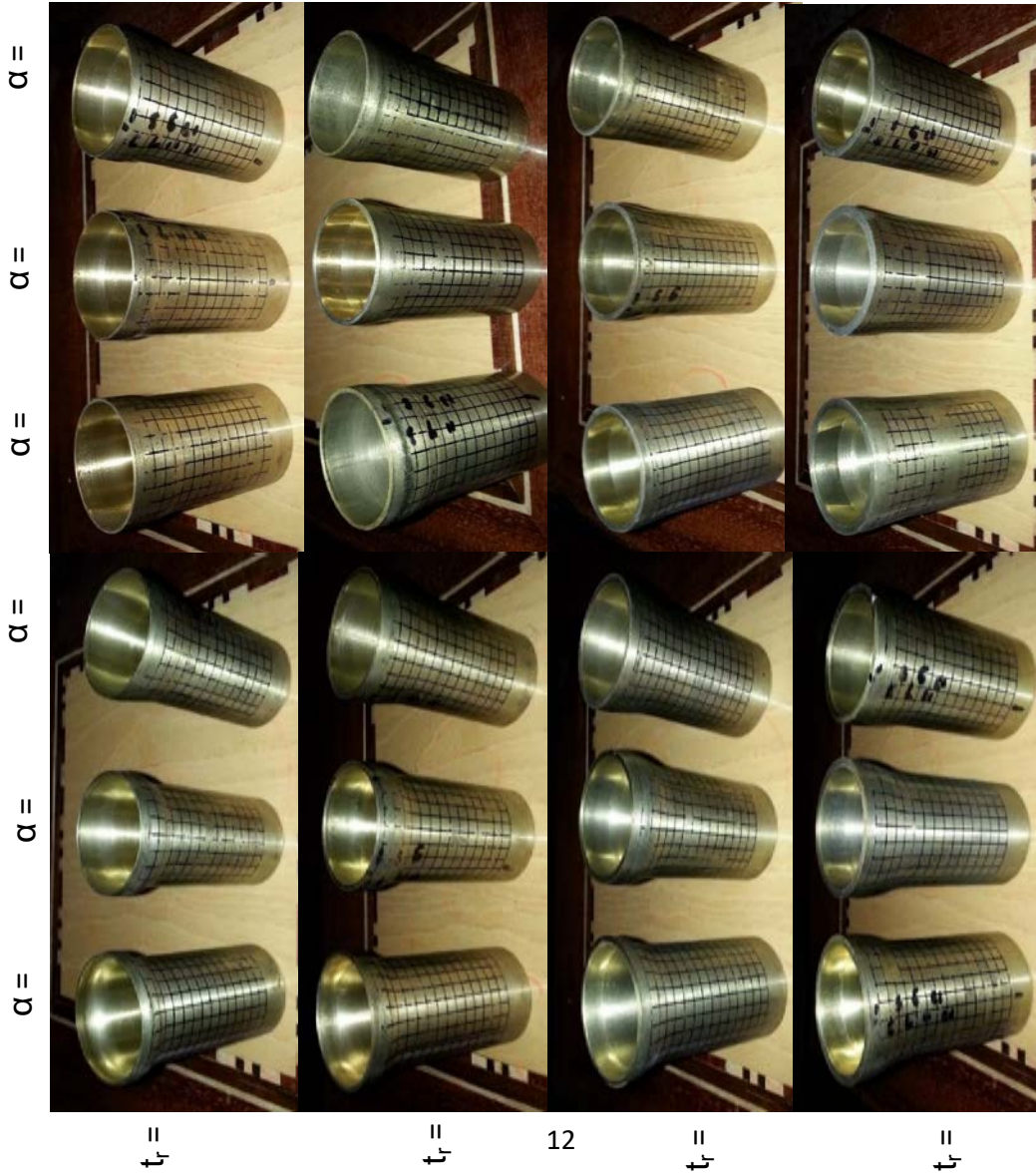
شكل رقم (7) يمثل صور للعينات الخاصة باختبار نسبة التوسيع لعينات ذات سمك نسبي (0.1) ولزاويا نصفية مختلفة



Relative Thickness Tests

اختبارات السمك النسبي

في هذا الاختبار تم تحديد أربعة اسماك نسبية مختلفة لجدار عينات الاختبار الأنبوبية وهي (0.2 , 0.1 , 0.05)، وينسب التوسيع الأربعة المذكورة في أعلاه وللزوايا النصفية الثلاثة وتم توسيع العينات باستخدام قوالب التشكيل البالغ عددها (12) وبهذا يكون مجموع العينات الأنبوبية في هذا الاختبار (48) عينة ، إذ تضمن هذا الاختبار مدى واسع من عمليات التوسيع الأنبوبية وصولاً إلى الحالة التي يحصل فيها الانبعاج الموضعي عند اصغر سمك واكبر زاوية نصفية لقالب التشكيل واكبر نسبة توسيع. بالإضافة إلى الاختبارات المشار إليها في أعلاه فقد أجريت تجربة الشد على عينة شد قياسية وتبين إن قيمة إجهاد الخضوع لمادة العينات هي $\gamma_0 = 110MPa$ وان أس الاصلاد الانفعالي $n = 0.58$ وتبين الأشكال (11 and 10,9,8) صور العينات المختلفة ذات الأسماك النسبية (1.385 and 1.28,1.1667,1.0526) على التوالي.





شكل رقم (10) يمثل صور العينات الخاصة بنسبة التوسيع (1.28) ولأسماك النسبية وللزوايا النصفية المختلفة

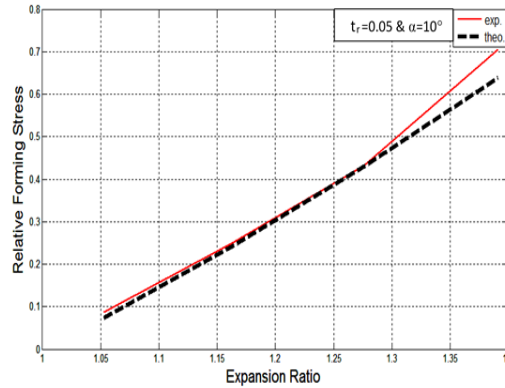
شكل رقم (11) يمثل صور للعينات الخاصة بنسبة التوسيع (1.385) ولأسماك النسبية، وللزوايا النصفية المختلفة

مقارنة النتائج التجريبية والنظرية

لابد من الإشارة هنا إلى أنه في الحسابات النظرية تم إهمال تأثير الحناية والقص وتم اعتبار مساحة التلامس بين السطح المخروطي لقلب التشكيل و سطح جدار العينة الأنبوبية مثالية, علاوة على ذلك فإن حدود التكامل في العلاقات النظرية مبينة على أساس أنه نصف قطر العينة الأنبوبية الداخلي النهائي بعد التوسيع هو نفسه نصف قطر الجزء الأسطواني من قلب التشكيل بينما في الواقع العملي هو أكبر.

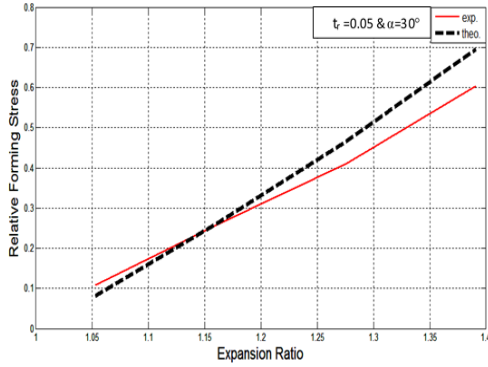
مقارنة النتائج التجريبية والنظرية لعلاقة إجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع. مقارنة النتائج عند السمك النسبي (0.05).

الشكل (12) يبين علاقة إجهاد التشكيل النسبي مع نسبة التوسيع لكلا الجانبين العملي والنظري (معادلة رقم 16) وللسمك النسبي (0.05) وللزاوية النصفية لقلب التشكيل (10°) حيث نلاحظ تطابق الجانب العملي المتمثل بالخط المتصل ذو اللون الأحمر مع الجانب النظري المتمثل بالخط المتقطع باللون الأسود ولنسب التوسيع الثلاثة الأولى (1.0526, 1.1667 and 1.28) وحدث انحراف قليل في نسبة التوسيع الكبرى (1.385) وهذا يفسره تغير ظروف الاحتكاك بين الأسطح المتلامسة نتيجة لارتفاع نسبة التوسيع وبزاوية نصفية صغيرة مما يجعل مساحة التلامس تكون أكبر ما يمكن وهذا بدوره يقلل من دور مادة التزييت التي تم وضعها على أسطح التلامس لكل من قلب التشكيل والسطح الداخلي لجدار العينة الأنبوبية. أما الشكل (13) فيبين العلاقة ذاتها وعند نفس السمك النسبي لكن بتغير الزاوية النصفية إلى (20°) حيث ينقسم الشكل إلى جزئين رئيسيين في الجزء الأول حيث نسب التوسيع (1.1667 and 1.0526) يكون فيها الجانب العملي أكبر من الجانب النظري أما في نسبتي التوسيع (1.385 and 1.28) فينقلب الحال ليكون الجانب النظري منه أعلى من الجانب العملي. والسبب في ذلك يعود إلى أن نسبة تأثير الحناية عند نسب التوسيع القليلة تكون كبيرة وتقل تدريجيا كلما زادت نسب التوسيع وهذا ما يسبب فرق بين الجانبين النظري والعملي. في حين يتضح لنا من خلال الشكل (14) الذي يوضح ذات العلاقة عند السمك النسبي (0.05) ولكن عند الزاوية النصفية (30°) لقلب التشكيل والحال في هذا الشكل لا يختلف كثيرا عما حصل عند الزاوية (20°).

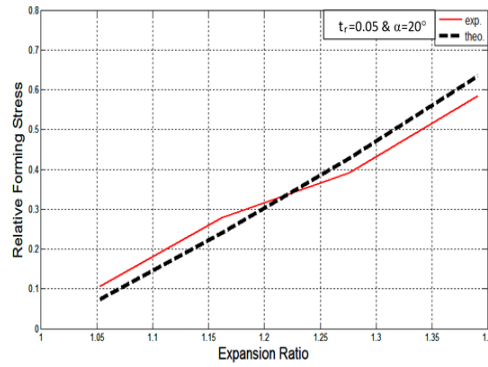


شكل (12) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات

$$.t_r=0.05 \text{ and } \alpha=10^\circ$$



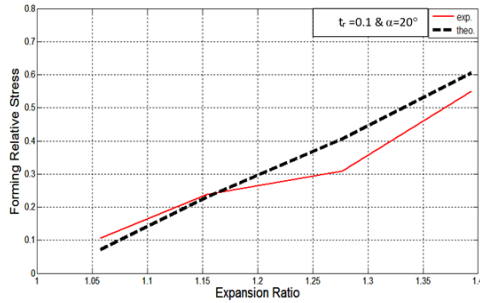
شكل (14) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات
 . $t_r=0.05$ and $\alpha=30^\circ$



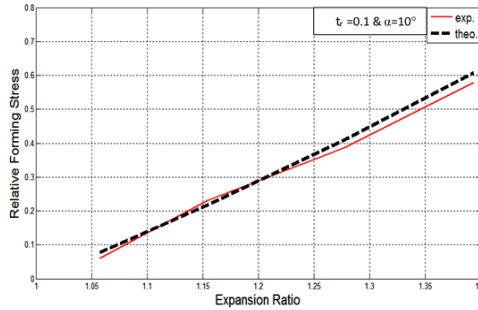
شكل (13) يمثل علاقة (y_r) مع (ER)
 للعينات . $t_r=0.05$ and $\alpha=20^\circ$

مقارنة النتائج عند السمك النسبي (0.1).

الشكل (15) يبين العلاقة عند السمك النسبي (0.1) وعند الزاوية النصفية (10°) لقلب التشكيل حيث نلاحظ تطابق الجانبين العملي والنظري في غالب الأمر سوى الانحراف الحاصل عند نسبة التوسيع (1.385) والسبب يعود في ذلك إلى كون مساحة التلامس في الجانب النظري ستكون أعلى من تلك التي تكون حاضرة في الجانب العملي نتيجة الانحناء الذي يحصل للحافة الأمامية للعينة الأنبوبية الأمر الذي يقلل من المساحة الحقيقية للتلامس.



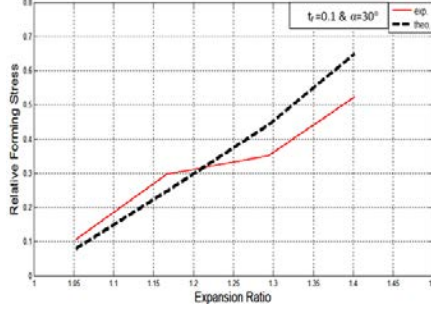
شكل (16) يمثل علاقة (y_r) مع (ER)
 للعينات . $t_r=0.1$ and $\alpha=20^\circ$



شكل (15) يمثل علاقة (y_r) مع (ER)
 للعينات . $t_r=0.1$ and $\alpha=10^\circ$

أما في الشكل (16) أعلاه الذي يوضح العلاقة ذاتها عند الزاوية (20°) ولنفس السمك النسبي فنلاحظ أن التطابق اختلف فأصبح الجانب العملي أعلى من الجانب النظري وخاصة في أقل نسبة توسيع (1.0526)، وهذا يبين تأثير نسبة الحني العالية في قيمة إجهاد التشكيل النسبي وتبدأ هذه النسبة بالتناقص كلما زادت نسبة التوسيع كما يبدو ذلك واضحا في الشكل لحين نسبة التوسيع (1.28) بعدها يتراجع هذا التناقص بسبب التداخل الذي يحصل بسبب القص الذي يظهر في نسب التوسيع العالية وعند الزوايا النصفية الكبيرة أما الشكل (17) الذي يمثل العلاقة عند السمك النسبي (0.1) والزاوية النصفية (30°) حيث يتميز هذا الشكل عن سابقه بتقدم تأثير القص بالزحف باتجاه نسب التوسيع القليلة حيث أصبح الفارق أكبر عند نسبة التوسيع (1.1667) وكذلك عند النسبة (1.0526) والسبب الثاني الذي أدى إلى هذه الزيادة هو زيادة نسبة مساهمة قوة الحني بسبب زيادة الزاوية النصفية.

كما نلاحظ ارتفاع بسيط في قيم إجهاد التشكيل النسبي النظري كلما كانت الزاوية النصفية أكبر لنفس السمك النسبي على العكس من إجهاد التشكيل النسبي العملي الذي يحصل له انخفاض والسبب يعود إلى أن مساحة التلامس بين سطحي قلب التشكيل والعينة الأنبوبية تقل كلما زادت الزاوية النصفية لقلب التشكيل.

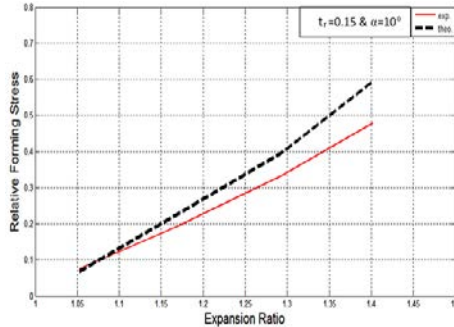


شكل (17) يمثل علاقة (y_r) مع
(ER) للعينات $t_r=0.1$ and $\alpha=30^\circ$.

مقارنة النتائج عند السمك النسبي (0.15).

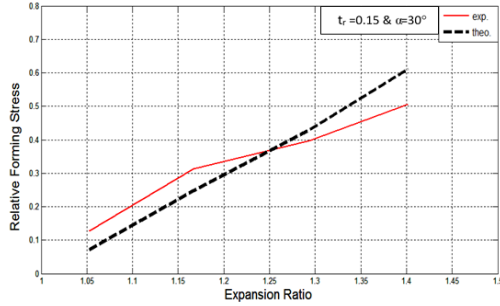
كلما زاد السمك النسبي كلما زادت مساحة مقطع العينات الأنبوبية وهذا بالنتيجة يؤدي إلى إن إجهاد التشكيل النسبي اللازم لإتمام العملية يكون أقل، وهذا ما نلاحظه في الشكل (18) الذي يمثل علاقة إجهاد التشكيل النسبي العملي والنظري مع نسبة التوسيع للسمك النسبي (0.15) وللزاوية النصفية (10°) ويظهر لنا من خلاله أن التطابق بين الجانب النظري قد حصل فقط في أقل نسبة توسيع أما في باقي النسب فتكون قيمة إجهاد التشكيل النسبي العملي دائما أقل من قيمته في الجانب النظري وهذا متوقع ويعتمد على مساحة التلامس ونسبة تأثير قوة الحني أما تأثير الزاوية النصفية (20°) فيبدو واضحا في الشكل (19) حيث يحصل التطابق في نسبي التوسيع (1.0526 and 1.1667) بسبب ارتفاع تأثير الحني في هذه النسب وتناقصه في النسبة الأعلى منه، وكما نلاحظ إن قيمة إجهاد التشكيل النسبي قد تراجعت عند نسبة التوسيع (1.385) بسبب تداخل تأثير القص مع الحني حيث بارتفاع نسبة التوسيع ترتفع معه قوة القص وتقل معه نسبة مساهمة تأثير الحني. تتكرر هذه الملاحظات ذاتها في الشكل (20) حيث العلاقة بين إجهاد التشكيل النسبي ونسبة التوسيع لكن هذه المرة عند الزاوية (30°) ونفس السمك النسبي حيث هيمن الجانب العملي في أغلب نسب التوسيع على الجانب النظري وأصبح أعلى منه بسبب دور الحناية الذي ذكرنا انه ترتفع قيمته بارتفاع قيمة الزاوية النصفية لقلب التشكيل كلما زادت نسبة التوسيع أصبح دور الحناية أقل في قيمة إجهاد التشكيل النسبي الكلية، وعموما نلاحظ إن إجهاد التشكيل

النظري والعملي قد
السمك النسبي عن

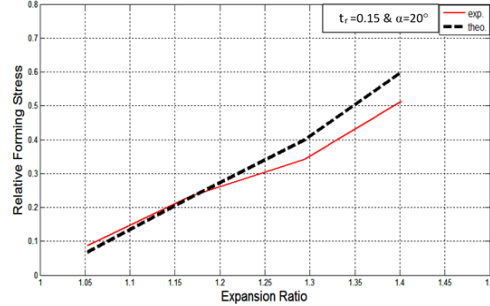


شكل (18) يمثل علاقة (y_r) مع (ER)
للعينات $t_r=0.15$ and $\alpha=10^\circ$.

تناقصت قيمته في هذا
الأسماك السابقة.



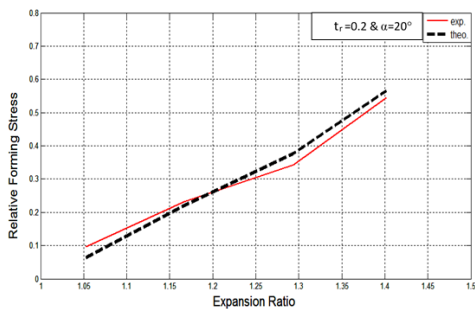
شكل (20) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات $t_r=0.15$ and $\alpha=30^\circ$.



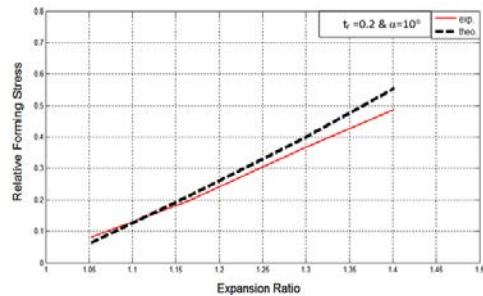
شكل (19) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات $t_r=0.15$ and $\alpha=20^\circ$.

مقارنة النتائج عند السمك النسبي (0.2).

الشكل (21) يوضح العلاقة للسمك النسب (0.2) وللزاوية النصفية (10°) حيث يتضح من خلاله أن أفضل تطابق دائما ما يحصل عند هذه الزاوية وخصوصا عن نسب التوسيع الصغيرة، وأن هذا الفارق يزداد بشكل تدريجي كلما زادت نسبة التوسيع ويعود السبب في ذلك إلى الاختلاف المستمر عند كل نسبة توسيع بين المساحة الحقيقية للتلامس بين جدار العينة الداخلي وبين السطح المخروطي من قلب التشكيل ففي نسب التوسيع القليلة يكون هنالك أكثر توافقا بين المساحة في الجانب النظري والعملي وتبدأ المساحة الفعلية بالتناقص كلما زادت نسبة التوسيع. في حين الشكل (22) الذي يوضح العلاقة نفسها لكن باستخدام زاوية نصفية (20°) لقلب التشكيل نلاحظ أن إجهاد التشكيل النسبي العملي أعلى من ذلك النظري في نسب التوسيع (1.1667 and 1.0526) في حين يصبح أقل منه في النسبتين (1.385 and 1.28) ويبقى على مقربة منه ويفسر ذلك أنه في الحالة الأولى كان تأثير الحناية هو المتغلب على فرق المساحة بين الجانبين. أما الحالة الثانية فعلى العكس ولكن ظهور قوة القص عوضت جزء من الفارق.



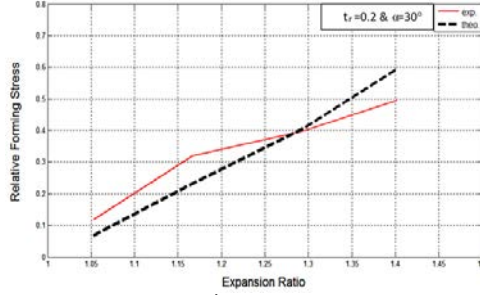
شكل (22) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات $t_r=0.2$ and $\alpha=20^\circ$.



شكل (21) يمثل علاقة (y_r) مع (ER) للعينات $t_r=0.2$ and $\alpha=10^\circ$.

بينما يوضح الشكل (23) حالة إجهاد التشكيل النسبي الأخيرة مع نسبة التوسيع وبالسمك النسبي (0.2) وباستخدام قلب تشكيل ذو زاوية نصفية (30°) حيث فيه ينقسم الشكل إلى جزئين في الأول

العملي اكبر من الحالات ذلك هو ازدياد تأثير التوسيع القليلة وامتدادها التوسيع (1.0526)، في حين منه والذي فيه تصبح العملي اقل من النظري سابقا هي تراجع نسبة الإجهاد الكلي وظهور



شكل (23) يمثل علاقة (γ_r) مع (ER) للعينات $t_r=0.2$ and $\alpha=30^\circ$.

يكون إجهاد التشكيل السابقة جميعا، وسبب الحناية في نسب لتشمل اغلب نسب (1.28 and 1.1667) الجزء القليل المتبقي قيمة إجهاد التشكيل والسبب كما ذكرنا إجهاد الحناية إلى قوة القص

التي تزيد من إجهاد التشكيل العملي. وعموما فإن التوافق بين الجانبين العملي والنظري قد حصل في جميع الحالات المشار إليها سابقا ولكن مع وجود فارق بين حالة وأخرى ففي الزاوية النصفية (10°) يكون التوافق أكثر مما هو عليه في الزاويتين المتبقيتين للعلاقة بين إجهاد التشكيل النسبي ونسب التوسيع وبأسماك نسبية مختلفة.

Conclusions

الاستنتاجات

- 1- أظهرت النتائج توافقا جيدا بين الجانبين النظري والعملي وخصوصا في مجال توقع إجهاد التشكيل النسبي اللازم لإنجاز عملية التوسيع ومن خلالهما نستنتج الآتي:
إن إجهاد التشكيل النسبي يزداد كلما زادت نسبة التوسيع ويتراوح بين (0.1-0.7) للعينات المختبرة.
- 2- إجهاد التشكيل النسبي يقل كلما زاد السمك النسبي مع ثبات نسبة التوسيع والزاوية النصفية لقلب التشكيل.
- 3- إجهاد التشكيل النسبي يزداد بشكل طفيف مع زيادة الزاوية النصفية للقالب.
- 4- يطغى تأثير الحناية على إجهاد التشكيل النسبي عند نسب التوسيع القليل (1.0526) وخصوصا عند الزاوية النصفية الكبيرة (30°).
- 5- إن نسبة مساهمة إجهاد التشكيل النسبي المصروف على عملية الحني إلى الإجهاد النسبي الكلي وصلت إلى حوالي (80%) عند نسبة التوسيع (1.0526) في حين تراجعت إلى (10%) عند أكبر نسبة توسيع (1.385).
- 6- إن التوافق بين الجانبين العملي والنظري بدا جيدا في مجال التنبؤ بإجهاد التشكيل النسبي عموما إلا في حالات قليلة عند نسبة التوسيع الأكبر (1.385) والسمك النسبي (0.2 and 0.15).

المصادر

- [1].George Sachs, and W. M. Baldwin, JR "Stress analysis of tube- sinking" Transactions of ASME 1946, 68 (6), 655-662.
- [2]. Hill R., "the Mathematical theory of Plasticity" Oxford at the Clarendon Press, P 269, 1950.
- [3]. B. Avitzur"Metal forming: processes and analysis" Mc. Graw- Hill book company; Sydney- 1968.
- [4].Marciniak, Z., Duncan, J.L., 1992. "The mechanics of sheet metal forming" Edward Arnold, London.
- [5].تحسين طه عثمان ومحمد علي إبراهيم (دراسة تأثير خاصية الأصداد الانفعالي على عملية التوسيع باستخدام قوالب مخروطية) مجلة جامعة تكريت/ قطاع الشؤون الهندسية/المجلد 5/ العدد 4/ ك 1/ 1998ص 21-43.
- [6].F.D. Fischer, F.G. Rammerstorfer& T. Daxner.(2006) "Flaring- An analytical approach" International Journal of Mechanical Sciences 48, 1246-1255.
- [7].M. Shakeri, S. Salehghaffari and R. Mirzaeifar"Expansion of circular tubes by rigid tubes as impact energy absorbers: experimental and theoretical investigation", TCRS Vol.12 No.5(2007) pp.493-501.
- [8] . A. Karrech and A. Seibi "Analytical model for the Expansion of tubes under tension "Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 356-362. www.elsevier.com/locate/jmatprotec.
- [9].Joseph Perry and Jacob Aboudi"Elasto-Plastic Stresses in Thick Walled Cylinders" Journal of Pressure Vessel Technology, AUGUST 2003, Vol.125, pp.248-252.
- [10].Hausenbauer, G.F., Lee,G.C.,1966." Stress in thick walled conical shells"Nuclear Engineering and Design 3 (3), 394–401.
- [11].Jialing Yang, Min Lou, Yunlong Hua, and Guoxing Lu " Energy absorption of Expansion tubes using a conical cylindrical die: experiments and numerical simulation." International Journal of Mechanical Sciences 52 (2010) 716-725 www.elsevier.com/locate/ijmecsci.
- [12].Seibi, A.C., Al-Hiddabi, S., Pervez, T., 2005 "Structural behavior of a solid tubular under large plastic radial expansion" ASME Journal of Energy Resources and Technology 127, 323–326.
- [13].Omar S. AL-Abri, "Analytical and Numerical solution for large plastic Deformation of Solid Expandable Tubular." SPE paper # 152370- STU Colorado, USA, 30 October- 2 November 2011.
- [14].Omar S.AL -Abri, and Tasneem Pervez "Structural behavior of solid expandable tubular undergoes radial expansion process- Analytical, numerical, and experimental approaches" International Journal Solids and Structures 50 (2013) 2980- 2994, www.elsevier.com/locate/ijsolstr.
- [15]. Jakirahemed MD, M.J. Davidson, G. Venkateswarlu And L. Venugopal " Study on effect of process parameters on the expansion of thin walled Aluminum 7075 tubes " International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 36, November, 2011 pp.83-94.
- [16].Pervez, T., 2010. "Experimental and numerical investigations of expandable tubular structural integrity for well applications." Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 41 (1–2), 147–154.

- [17]. F.J. Sanchez, O.S. AL- Abri "Tube Expansion under Various Down- Hole End Conditions" TJER 2013, Vol. 10, No 1, 25-40.
- [18]. Chakrabarty J., 2006 "Theory of Plasticity" third ed. Elsevier Butterworth, Heinemann, UK.
- [19]. GEOFFREY W. ROWE "Principles of Industrial Metalworking Processes" University of Birmingham, P 54, 1968.
- [20]. Male A. T. and Cockcroft M. G. "A Method for Determination of Coefficient of Friction of Metal under condition of Bulk Plastic Deformation" J. Inst. Metals vol. 13 p. 38 ,1964.